



SUOMI – FINLAND
(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

(12) **EUROOPAN PATENTTIJULKAISUN KÄÄNNÖS**
ÖVERSÄTTNING AV EUROPEISK PATENTSKRIFT

(10) **FI/EP0966689 T3**

(45) Käännöksen kuul. pvm - Övers. kungörelsedag **31.01.2002**

(80) Euroopan patentin myöntämispäivä -
 Meddelandedatum för det europeiska patentet **19.09.2001**

(51) Kv.Ik.7 - Int.kl.7
G01R 33/035, 33/022

(86) Euroopan patentihakemus - Europeisk patentansökan **EP98910840.2**

(86) (24) Alkupäivä - Löpdag **06.03.1998**

(87) EP-hakemuksen julkiseksi tulo pvm -
 EP-ansökans publiceringsdag **29.12.1999**

(86) Kv. hakemus - Int. ansökan **PCT/GB9800685**

(30) Etuoikeus - Prioritet
 10.03.1997 GB 9704911

(73) Haltija - Innehavare

1 •QinetiQ Limited, 85 Buckingham Gate, London, SW1 6TD, ISO-BRITANNIA, (GB)

(72) Keksiä - Uppfintare

1 •KEENE, Mark, Nicholas, c/o Dera, Malvern St. Andrews Road, Malvern Worcs. WR14 3PS, ISO-BRITANNIA, (GB)
 2 •SATCHELL, Julian, Simon, c/o Dera, Malvern St. Andrews Road, Malvern Worcs. WR14 3PS, ISO-BRITANNIA, (GB)

(74) Asiamies - Ombud: Berggren Oy Ab
 Jaakonkatu 3 A, 00100 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning

Magneettinen gradiometri
 Magnetisk gradiometer

(56) Viitejulkaisut - Anförläda publikationer

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Magneettinen gradiometri – Magnetisk gradiometer

Keksintö liittyy laitteeseen, jolla mitataan magneettista kenttäinformaatiota, ja sitä voidaan käyttää erityisesti magneettikentän gradientikomponenttien määrittämiseen.

5 Järjestelmää voidaan käyttää luokkaa 100 fTm^{-1} olevien magneettikentän gradienttien ilmaisemiseen liikkuvalta alustalta maan magneettikentän (likimäärin $70 \mu\text{T}$) taustaa vasten.

SQUID-magnetometrit (SQUID, superconducting quantum interference devices; suprajohtavat kvantti-interferenssilaitteet) ovat erittäin herkkiä laitteita, jotka pystyvät mittaamaan magneettikentän vektorikomponentteja, jotka ovat niinkin pieniä kuin 10^{-9} kertaa maan ympäristökenttää. Magneettikenttien mittaus lähellä herkkyyskynnystä maan magneettikentän mukana ollessa tuottaa monia vaikeuksia. Esimerkiksi geomagneettinen kohina ja ihmisen tuottama kohina ovat aina hallitsevia. Lisäksi elleivät SQUIDit ole jääkästiksi asennetut, pienetkin liikkeet maan magneettikenttää kuvautuvat ulostulossa isoina muutoksina, ja siksi on usein hyödyllisempää ilmaista gradientti magneettikenttää eikä itse magneettikenttää.

Magneettikentän gradientti voidaan mitata käyttääen itseisjohtavaa SQUID-gradiometriä. Itseisjohtavassa SQUID-gradiometrissä on ilmaisukelat, jotka on tehty kahdesta silmukasta, jotka on yhdistetty napaisuudeltaan vastakkaisina. Tällaisessa koonpanossa ilmaisukeloiden täytyy olla hyvin balansoidut ja kohdennetut, ja pienet osamuutokset kunkin kelan tehollisessa koossa tai orientaatiossa tuottavat epäasaisista magneettikentistä lähtösignaaleja, joita ei voi erottaa todellisista gradienteista. Balansointi toteutetaan tavallisesti asettelulla erityisissä kalibrointilaitteistoissa laboratorio-olosuhteissa, ja se on kallis aikaa vievä menetelmä. Lisäksi koska ilmaisiin tulee suuri taustakenttä, rakenteeseen indusoituu virtoja, jotka aiheuttavat $1/f$ -kohinaa ja voivat aiheuttaa hysteresiongelmia.

Gradientisignaali on suurempi sellaisilla keloilla, joita erottaa pitempi perusviiva, käyttökelpoisen perusviivan ollessa keloihin menevien kytkentöjen siedettävän induktanssin rajoittama. Tämä perusviivan rajoitus voidaan poistaa korvaamalla gradiometrin ilmaisin magnetometriparilla, missä ulostulot vähennetään konfiguroidun gradiometrin muodostamiseksi. Tällainen laitekokoonpano vaatii suuren stabiiliuden ja lineaarisuuden sekä aika- että taajuusalueessa. Lisäksi, samoin kuin balansointivaikeudet, kukaan ilmaisin vaatii hyvin suuren dynaamisen alueen (paremman kuin

$1:10^9$), jos sen on määrä olla käytettävissä liikkuvalla alustalla, kuten usein vaaditaan. Lisäksi on silti olemassa se ongelma, että magneettikenttä esiintyy rakenteessa.

US-patentijulkaisussa 5 122 744 on kuvattu viritetty kolmen ilmaisimen konfiguroitu gradiometri (Three SQUID Gradiometer, TSG), jossa käytetään keskeistä il-

5 maisinta takaisinkytämään keloihin se maan magneettikentän komponentti, joka ympäröi kutakin kolmea ilmaisinta. Ulomman ilmaisinparin ulostulo vähennetään ja tämä erotus antaa tarvittavan gradientin mittausarvon, jos takaisinkytkentäkenttä yhtenäinen. Tässä konfiguraatiossa dynaamista aluetta on huomattavasti parannettu, ja maan magneettikentän yksi komponentti ei osu suoraan ilmaisiin.

10 Sama tekniikka on ulotettu SQUID-magnetometrien sijasta fluxgate-magnetometreihin perustuvien gradiometreihin [R.H. Koch ym.: "Room temperature three sensor magnetic field gradiometer", *Review of Scientific Instruments*, Jan. 1996, AIP, USA, vol. 67, No. 1, sivut 230-235].

15 Stabiiliuden, epälineaarisuuden, takaisinkytkenän yhtenäisyyden sekä kalibroinnin ja balanssin määräämisen tarpeen ongelmat eivät kuitenkaan ole voitetut. Vaikeus vähentää anturien ulostulot tarkasti aiheuttaa monet ongelmista.

Esillä olevalle keksinnölle olennaista on myös käsittelytekniikka, jota käytetään lii-kekohinan kompensoimiseksi sukellusveneiden erittäin pientaajuisissa vastaanotto-antenneissa [R.J. Dinger ja J.R. Davis, *Proc. IEEE*, vol. 64, No. 10, Oct. 1976].

20 Lisätekniikka SQUID-ilmaisimien suorituskyvyn parantamiseksi, joka tekniikka perustuu adaptiiviseen positiiviseen takaisinkytämään, tunnetaan US-patentista 5 488 295. = FI 702411

25 Tämän patenttiselityksessä tarkoituksissa termin magnetometri pitää ymmärtää viittaavan laitteeseen, jolla mitataan magneettikentän komponentti jossakin nimenomaisessa suunnassa, ja termin gradiometrin pitää ymmärtää viittaavan laitteeseen, jolla mitataan magneettikentän gradientikomponentteja. Kokonaiskenttämagnetometrin pitää ymmärtää viittaavan laitteeseen, jolla mitataan kokonaismagneettikenttä, ts. magneettikentän komponenttien kolmessa ortogonaalisessa suunnassa neliöiden summan neliöjuuri.

30 Esillä olevan keksinnön mukaan järjestelmä, jolla mitataan magneettikentän yksi tai useampi gradientikomponentti, käsittää:

(i) vähintään kaksi magneettista ilmaisinta, jotka ilmaisevat magneettikentän, jolloin kukin ilmaisin kehittää ilmaisinulostulon, joilla ilmaisinulostuloilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E , ja jolloin vähintään kaksi ilmaisimista on sovitettu ilmaisemaan magneettikenttä olennaisesti samassa suunnassa, ja

5 (ii) välineet ilmaisinulostulojen adaptiivisen signaalinkäsittelyn suorittamiseksi sitten, että järjestelmä on adaptiivisesti balansoitu, jolloin mainitut välineet kehittävät magneettikentän yhden tai useamman gradienttikomponentin,

tunnettu siitä, että

(iii) järjestelmä käsittää yleistakaisinkytkentävälineet olennaisesti tasaisen magneet-

10 tikentän aikaansaamiseksi kahden magneettisen ilmaisimen kohdalla, ja

(iv) adaptiiviset signaalinkäsittelyvälineet käsittävät välineet ilmaisinulostulojen kokonaisenergian E minimoiseksi rajoituksen alaisena, jolloin rajoitus määrää, mikä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tuotetaan.

Keksintö saa aikaan sen edun, että se eliminoi tarpeen kalibroida ja määrätä balanssi kontrolloiduissa olosuhteissa ja ylläpitää kalibrointia pitkät ajat. Lisäksi mekaaniselle jäykkyydelle ja stabiiliudelle asetetut vaatimukset, jotka edellytetään pienikohdaisessa toiminnassa, helpottuvat huomattavasti. Tunnettujen konfiguroitujen järjestelmien edut säilytetään.

Edullisessa suoritusmuodossa välineet ilmaisinulostulojen kokonaisenergian E minimoimiseksi voivat tuottaa myös kokonaismagneettikentän mittausarvon, minkä mukaan rajoitus määrää, mitkä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tai kokonaismagneettikentän mittausarvosta tuotetaan.

Eräässä toisessa edullisessa suoritusmuodossa gradiometri voi käsittää tietokoneen, johon on ladattu adaptiivinen signaalinkäsittelyalgoritmi (ASPA, adaptive signal processing algorithm).

Gradiometrin yleistakaisinkytkentävälineet voidaan sovittaa myös saamaan aikaan olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla. Yleistakaisinkytkentävälineet voivat käsittää vähintään yhden yleistakaisinkytkentäkelaryhmän. Kukin ryhmä voi käsittää esimerkiksi kaksi

30 tai useampia kuin kaksi Helmholtzin kelaa.

Gradiometri voi käsittää myös:

välineet vähintään yhden erosignaalin kehittämiseksi kahden ilmaisinulostulon välillä, jolloin mainitut ilmaisinulostulot vastaavat kukaan magneettikenttää ollenaisesti samassa suunnassa, ja

5 analogi-digitaalimuunnosvälineet mainittujen yhden tai useamman erosignaalin ja kahden tai useamman ilmaisinulostulon muuntamiseksi vastaavaksi digitaaliseksi dataksi.

Vähintään yksi magneettisista ilmaisimista voi olla yksi seuraavista: fluxgate-magnetometri, Hall-magnetometri, magnetoresistivinen anturi tai suprajohtava 10 kvanti-interferenssimagnetometri (SQUID, superconducting quantum interference device). Vaihtoehtoisen vähintään yksi magneettisista ilmaisimista voi olla gradiometri.

Jos gradiometriin sisältyy SQUID-magnetometri, gradiometri sisältää myös jäähdystävät SQUID-magnetometrin lämpötilan alentamiseksi. Kussakin SQUID-magnetometrissä voi olla siihen liittyvät paikalliset takaisinkytentävälineet magneettivuon ollenaisesti vakion tilan ylläpitämiseksi asianomaisessa SQUID-magnetometrissä. 15

Keksinnön eräässä suoritusmuodossa gradiometri käsittää:

vähintään neljä magneettista ilmaisinta magneettikentän ilmaisemiseksi, jolloin 20 kolme antureista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän kolmessa ollenaisesti ortogonaalisessa suunnassa, ja jolloin vähintään kaksi mainituista ilmaisimista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän ollenaisesti samassa suunnassa.

Lisäksi eräässä edullisessa suoritusmuodossa gradiometri voi käsittää vähintään 25 kahdeksan magneettista ilmaisinta. Nämä kahdeksan tai useammattakin kahdeksan magneettista ilmaisinta voivat olla sovitut esimerkiksi tetraedrirakenteen kärkipisteisiin. Tässä laitekokoonpanossa kolme yleistakaisinkytentäkelaryhmää voidaan orientoida kolmeen ollenaisesti ortogonaaliseen suuntaan ollenaisesti tasaisen magneettikentän kehittämiseksi kunkin kahdeksasta tai useammasta magneettisesta 30 ilmaisimesta kohdalla.

Eräässä toisessa suoritusmuodossa gradiometri voi käsittää vähintään kolme magneettista ilmaisinta, jolloin vähintään kolme ilmaisimista on orientoitu ollenaisesti

samaan suuntaan ja jolloin adaptiivisen signaalinkäsittelyn suorittavat välineet voivat kehittää magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentin.

Keksinnön eräässä toisessa suoritusmuodossa järjestelmä voidaan sovittaa saamaan aikaan biomagneettinen ilmaisujärjestelmä. Mainittu vähintään yksi yleistakaisinkytkenkäelaryhmä voidaan sovittaa ympäröimään mitattavan magneettikentän kehittävää subjektiä, esimerkiksi ihmissubjekti, jolloin subjekti voi olla hyvin lähellä magneettisia ilmaisimia. Tämä järjestelmä saa aikaan tavanomaisiin biomagneettisiin ilmaisujärjestelmiin verrattuna sen edun, että tavanomaisissa järjestelmissä vähittävää suurta magneettisesti suojaattua huonetta ei enää tarvita.

10 Keksinnön toisen näkökohdan mukaan menetelmä magneettikentän vähintään yhden gradienttikomponentin mittamiseksi käsitteää seuraavat vaiheet:

(i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kahdessa tai useammassa paikassa kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta käytäen, jolloin vähintään kaksi magneettikentän komponenttia ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,

15 (ii) kehitetään kaksi lähtösignaalia tai useampia lähtösignaaleja, joilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E , joka vastaa mainittuja magneettikentän komponentteja,

(iii) järjestetään yleistakaisinkytkenkä olennaisesti tasaisen magneettikentän muodossa mainittujen kahden tai useaman magneettisen ilmaisimen kohdalla,

20 (iv) suoritetaan lähtösignaalien adaptiivinen signaalinkäsittely ja minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu,

(v) rajoitetaan kokonaisenergian E , minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän gradienttikomponentti, ja

(vi) tuotetaan vähintään yksi magneettikentän gradienttikomponentin mittausarvo.

25 Keksinnön tämän näkökohdan eräässä suoritusmuodossa menetelmä voi käsitteää seuraavat vaiheet:

(i) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja

30 (ii) rajoitetaan kokonaisenergian E , minimointi siten, että tuotetaan kokonaismagneettikentän mittausarvo.

Keksinnön tämän näkökohdan vaihtoehtoisessa suoritusmuodossa menetelmä voi käsitteä vaiheen, jossa järjestetään ollenaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla. Menetelmää voidaan käyttää magneettikentän komponenttien mittaamiseksi ihmmissubjektiissa hyvin lähellä mainittuja kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta.

Keksinnön tämän näkökohdan eräässä toisessa suoritusmuodossa menetelmä voi käsitteä seuraavat vaiheet:

(i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kolmessa tai useammassa paikassa, jolloin vähintään kolme mainituista magneettikentän komponenteista ilmaistaan ollenaisesti samassa suunnassa,

(ii) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja

(iii) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentti.

15 Järjestelmä käyttää hyväksi adaptiivista signaalinkäsittelytekniikkaa suurten balanssitojen saavuttamiseksi. Tämän tekniikan soveltaminen magneettiseen ilmaisuun gradiometrijärjestelmien avulla ei ole tunnettu. Adaptiivisen signaalinkäsittelyn käyttäminen on olennaista järjestelmän sallimiseksi käyttää magneettikentän yleisen (tai kattavan) takaisinkytken mukaisesti. Liikuvalta alustalta käytettävälle järjestelmälle tämä järjestää riittävän dynaamisen alueen, jotta järjestelmä toimii maan magneettikentässä säälyttäen samalla suuret balanssitasot. Lisäksi se saa aikaan myös sen edun, että se estää ympäristön ulkoisen magneettikentän tulemisen suoraan ilmaisimiin. Lisäksi se helpottaa järjestelmän mekaanisen jäykkyyden reunaehdoja.

20

Keksintö selitetään nyt vain esimerkin avulla viitaten seuraaviin kuvioihin, joissa:

25 kuvio 1 esittää tavanomaisesti konfiguroidun, kahteen SQUID-magnetometriin perustuvan gradiometrilaitteen piirikaaviota magneettikentän gradienttien mittaamiseksi,

kuvio 2 esittää kolmen tunnetussa tekniikassa tunnetun SQUID-gradiometrilaitteen piirikaaviota,

30 kuvio 3 esittää SQUID-magnetometrilaitteen kaaviota,

kuvio 4 esittää vuokaaviota adaptiivisen signaalinkäsittelyalgoritmin (ASPA) kuvaamiseksi, joka algoritmi voi sisältyä tähän keksintöön,

kuvio 5 esittää esillä olevan keksinnön yksiakselisen yleistakaisinkytkentäsoviteilman piirikaaviota,

5 kuvio 6 esittää esillä olevan keksinnön neljän ilmaisimen suoritusmuodon kaaviota ja kuvaaa välineitää hyvän balanssin saamiseksi yhden gradientin mittaanista varten,

kuvio 7 esittää tuloksia, joita saadaan toimivasta järjestelmästä, joka on sovitettu kuten kuviossa 6,

10 kuvio 8 esittää yleistakaisinkytkentägradiometrin kaaviota magneettikentän viiden itsenäisen gradientimittausarvon saamiseksi, ja

kuvio 9 esittää tämän keksinnön biomagneettisen ilmaisujärjestelmän sovitelmaa.

Kuviossa 1 tavanomaisesti konfiguroitu gradiometri magneettikentän gradientin mittaaniseksi voi käsitteää kaksi magnetometriä 1a, 1b, tyypillisesti SQUID-magnetometriä, joita etäisyyys d (perusviietaisyyys) erottaa, minkä avulla kumpikin magnetometri 1a, 1b mittaa magneettikentän erityisessä paikassaan. Gradiometri käsitteää myös vahvistimet 2a, 2b ja integraattorit 3a, 3b, takaisinkytkentäkelat 4a, 4b ja vaskutset 5a, 5b, joilla on sama resistanssi, korjausvirran järjestämiseksi, joka tuottaa magneettikentän, joka yhtä suuri ja päinvastainen kuin SQUIDeihin tuleva ulkoinen magneettikenttä. Jännitteet V_a , V_b tuotetaan laitteesta magneettikenttää asianomaisen SQUID-magnetometrin 1a, 1b kohdalla vastaavina. Näiden kahden jännitteen erotus $V_a - V_b$ muodostaa magneettikentän gradientin likiarvon.

Kuviossa 1 esitetyllä kahden magnetometrin gradiometrillä on kahden SQUIDin suuri yhteissignaali, joka johtuu maan magneettikentästä ja vaatii sen vahvistimen lähes mahdottoman suuren yhteismuodon vaimennuksen, joka muodostaa kahden SQUID-magnetometrin 1a, 1b ulostulojen erotuksen. Lisäksi kumpikin magnetometri ja siihen liittyvä vahvistin tarvitsee hyvin suuren dynaamisen alueen (paremman kuin 1:10⁹) ja poikkeuksellisen hyvän lineaarisuuden, jos sitä on määritettyksellisesti käytettää liikkuvalla alustalla.

Kuviossa 2 tavanomainen kolmesta magnetometristä konfiguroitu gradiometri (TSG) (US-patentti 5 122 744) käsitteää kolme SQUID-magnetometriä 6, 7, 8 ja viisi takaisinkytkentäkelaa 9, 10, 11, 12, 13. SQUIDit 6, 7 ovat ilmaisin-SQUIDeja, joita käytetään magneettikentän mittaaniseen niitä vastaavissa paikoissa ja joita etäisyyys

1 erottaa. SQUID 8 toimii vertailumagnetometrinä, ja sitä käytetään kumoamaan maan magneettikentästä johtuvan taustamagneettikentän vaikutus SQUIDeissa 6, 7 takaisinkytkentäkelojen 9, 10 avulla, joille järjestetään signaali vertailu-SQUIDista 8. Kuviossa on esitetty myös vahvistimet 14, 15, 16 ja integraattorit 17, 18, 19.

5 5 Vertailu-SQUID-magnetometriä 8 käytetään samalla tavalla kuin ilmaisin-SQUID-magnetometrejä 6, 7 paitsi, että takaisinkytkentäs signaali SQUIDille 8 syötetään kai-kille kolmelle SQUIDille 6, 7, 8 takaisinkytkentäkelojen 9, 10, 11 kautta. Vahvistinta 6 ja integraattoria 19 käytetään takaisinkytkentäs signaalien kehittämiseksi keloille 9, 10, 11, jotka vähentävät taustamagneettikentän vastaavilta SQUIDelta 6, 7, 8.

10 10 Kenttägradientti mitataan vähentämällä kahdesta ilmaisimesta 6, 7 saatavat ulostulot. Eräs kolmen SQUIDin järjestelmän etu on se, että nämä ulostulot ovat paljon pienemmät kuin kahden SQUIDin gradiometriä (kuvio 1) käytäen mitatut ulostulot. Tässä konfiguroidussa järjestelmässä ei kuitenkaan ole voitettu stabiiliuden, epälineaarisuuden ja takaisinkytkennän yhtenäisyyden ongelmia eikä tarvetta kalibroida 15 ja määräätä balanssi.

20 Keksinnön taustan selvittämiseksi SQUID-magnetometrin toiminta selitetään kuvion 3 yhteydessä. SQUID 20 käsittää suprajohtavan silmukan 21, jossa on vähintään yksi heikko liitos 22 (esim. Josephson-liitos), joka pystyy ilmaisemaan jaksollisen virta-jännitesuhteen. SQUID on magneettisesti kytkeytyy suprajohtavaan vuomuuntajaan tulokelan 23 kautta. Vuomuuntajan sieppauskela 24 ilmaisee mitattavan magneettikentän. Mikäli ilmaistavassa magneettikentässä esiintyy muutos, tulokelaan 23 indu- soituu pyörrevirta. Pyörrevirta tuottaa magneettikentän, joka kytkeytyy SQUID-silmukkaan 21 ja ilmaistaan. SQUIDissa (kuten kuviossa 1, 2, 3 ja 4 esitetään) olisi tavallisesti siihen liittyvä vuomuuntaja.

25 25 Esillä olevan keksinnön gradiometri voidaan konfiguroida mittaamaan magneettikentän gradientteja ja magneettikenttiä, jotka ovat peräisin etäisistä lähteistä, maan suuren ja olennaisesti epätasaisen magneettikentän mukana ollessa, erityisesti jos gradiometriä käytetään liikkuvalla alustalla. Vaihtoehtoisesti gradiometri voidaan konfiguroida mittaamaan magneettikentän gradientteja tai magneettikenttiä, jotka ovat peräisin lähteistä, jotka ovat hyvin lähellä ilmaisinta, jolloin ilmaisin ei ole liikkuva, vaan sitä käytetään magneettisesti kohinallisessa ympäristössä.

Kuvio 5 esittää keksinnön erästä suoritusmuotoa: yksiakselista yleistakaisinkytken-tägradiometriä. Järjestelmä käsittää kaksi magnetometriä 25a, 25b, ja sitä voidaan käyttää joko magneettikentän gradienttien mittaamiseen tai joissakin laitekokoon-

panoissa kokonaismagneettikentän mittaamiseen. Magnetometrit 25a, 25b on esitetty SQUID-magnetometreinä, vaikka voidaan käyttää myös muita magnetometrilaitteita, esimerkiksi fluxgate-laitteita, Hall-anturi-ilmaisimia tai magnetoresistiivisiä laitteita.

5 Kaksi magnetometriä 25a, 25b sijaitsevat päallekkäin (aksiaalinen kokoonpano) tai vierekkäin (ei-aksiaalinen kokoonpano), ja ne ilmaisevat magneettikentän jossakin erityisessä suunnassa. Kummallakin SQUIDilla 25a, 25b on SQUID-magnetometrien tapauksessa sen oma takaisinkytentäkela 26a, 26b, joka ympäröi siihen liittyväät magnetometriä 25a, 25b. Nämä paikalliset takaisinkytentäkelat 26a, 26b saavat 10 aikaan vuolukituksen vastaaville SQUID-magnetometreille 25a, 25b, kuten tunnetusta tekniikasta tiedetään (katso kuviot 1 ja 2).

Kummassakin kanavassa on siihen liittyvä vahvistin 27a, 27b ja integraattori 28a, 28b, ja siksi kummallakin magnetometrillä 25a, 25b on lukuelektroniikka, joka toimii vuolukitussa silmukkamoodissa käyttäen sisäistä takaisinkytentää 28a:n, 28b:n 15 kautta siten, että elektroniikan takaisinkytentävuo ylläpitää magneettivuon vakiotila, joko äärellistä tai nollaa, kummassakin magnetometrissä 25a, 25b.

Koska magneettivuo magnetometreissä 25a, 25b on vakio, takaisinkytentävirta on 20 verrannollinen kumpaankin magnetometriin 25a, 25b kohdistettuun ulkoiseen magneettikenttään, ja siksi ulostulot 29a, 29b magnetometrien lukuelektroniikasta antavat takaisinkytentävirran mittausarvon vastaavaan magnetometrikanavaan. Magnetometrikanavien ulostulot 29a, 29b vastaavista integraattoreista 28a, 28b syötetään 25 sitten adaptiivisiin signaalinkäsittelyvälineisiin (selitetään jäljempänä).

Järjestelmä käsittää myös (yhteismuotoiset) yleistakaisinkytentäkelat 30a, 30b, jotka sulkevat magnetometrit 25a, 25b sisäänsä. Tämän patenttiselityksen tarkoituksessa termin yleistakaisinkytentä tulisi ymmärtää merkitsevän yhden tai useamman etäällä olevan kelaryhmän käytämistä magneettisen takaisinkytkennän syöttämiseksi kaikille magneettisille ilmaisimille samanaikaisesti. Lähtösignaalit 29a, 29b magnetometrikanavista siirretään komponenttiin 31, joka laskee elektronisesti yhteen kahdesta magnetometristä 25a, 25b saatavat magneettikenttäulostulot, ja sen jälkeen 30 yleistakaisinkytentäintegraattoriin 32. Ulostulo 33 yleistakaisinkytentäintegraattorista 32 siirretään yleistakaisinkytentäkelojen 30a, 30b kautta, ja ne voidaan siirtää signaalinkäsittelyvälineisiin.

Takaisinkytentäkentä emului realistisesti todellista ulkoista magneettikenttää, ja se syötetään likimain samanlaisena kumpaankin magnetometriin 25a, 25b. Magneto-

metrien 25a, 25b sulkeminen yleiskelojen 25a, 25b sisälle sallii siksi maan magneetikentän vaimentamisen magnetometrien 25a, 25b kohdalla. Ulostulo yleistakaisinskytkentäintegraattorista 32 antaa takaisinkytkentäkeloissa 30a, 30b kulkevan virran mittausarvon. Lähtödata, joka syötetään tietojenkäsittelyvälineisiin, käsittää siksi 5 yksittäisten magnetometrien ulostulot 29a, 29b ja yleistakaisinskytkentäkeloissa 30a, 30b kulkevan virran (ulostulo 33).

Yleistakaisinskytkennän käyttäminen helpottaa erillisten magnetometrikanavien sovitusvaatimuksia ja eliminoi magneettikentän indusoimaan kohinaan liittyvät ongelmamat, ja myös hystereesi- ja kentämodulointiongelmat pienenevät. Se myös helpottaa 10 magnetometrien 25a, 25b vaadittavan orientaatiokohdistuksen tarkkuutta. Kumpaankin SQUID-magnetometriin 25a, 25b liittyvien paikallistakaisinskytkentäkelojen 26a, 26b käyttäminen sallii magneettikentän gradienttimittauksen vaatiman pieni kohinan ja tarkan erotuskyvyn. Lisäksi se saa aikaan riittävän dynaamisen alueen ulommassa yleissilmukassa 30a, 30b maan magneettikentän käsittelyiseksi.

15 Käytettäessä magnetometrejä 25a, 25b liikkuvalta alustalta etäällä olevien magneettisten lähteiden mittamiseksi niiden täytyy selviytyä käänämisenstä maan magneettikentässä ($\sim 70 \mu\text{T}$), joka edustaa $\sim 140 \mu\text{T}$ muutosta. Tyypillisesti SQUID-magnetometrit ovat herkkiä 10 fT asti, ja siksi tämä on dynaaminen alue $1:1,4 \times 10^{10}$ eli 20 203 dB, joka ei ole saavutettavissa puolijohteisiin perustuva lukuelektronikkaa käyttäen. Tasaisen magneettikentän kumoamisella ja mittamalla magneettikentän gradientteja dynaamisen alueen ongelmat voidaan kuitenkin voittaa.

Käytettäessä kiinteältä alustalta lähellä olevien magneettisten lähteiden mittamiseksi tasaisen magneettikentän kumoaminen on myös edullista. Tällaisissa mittauksissa etäällä olevat magneettiset gradienttilähteet voivat myös häirittää mittauksia. 25 Tämä voidaan voittaa mittamalla ja eliminoimalla ulkoiset gradientit yleistakaisinskytkentää käyttäen.

Seuraava kuvaus liittyy gradiometriin, kun se on konfiguroitu mittamaan etäällä olevia lähteitä liikkuvalta alustalta. Tarkastellaan kahta magnetometriä 25a, 25b, jotka ilmaisevat magneettikentät B_A ja B_B . Magneettikentän gradientti on $(B_A - B_B)$, 30 ja keskimääräinen magneettikenttä puolitiessä niiden välillä on $(B_A + B_B)/2$, joka on verrannollinen magneettikentien summaan. Magneettikentät B_A , B_B lasketaan yhteen (31) ja tämä summa takaisinkytketään integraalitakaisinskytkennän kautta yleiskeloihin 30a, 30b (integraattori 32 asettaa automaattisesti tekijän 1/2). Magneettikenttä puolitiessä magnetometrien 25a, 25b välillä pidetään siksi tarvittaessa aina 35 vakiona (eli nollana jos se aluksi on nolla).

Kahdella magnetometrillä 25a, 25b on nyt poistettu maan magneettikentän, B_E , tasainen komponentti, jolloin saadaan $(B_A - B_E)$ ja $(B_B - B_E)$. Jos magneettikentän gradienttia, $(B_A - B_B)$, tarvitaan, niin tavanomaisissa gradiometrijärjestelmissä tämä johdetaan vähentämällä magnetometrien ulostulot. On kuitenkin lähes varmaa, että 5 magnetometreillä on niiden ulostulojen hieman eriävä skaalaus (epäsovitus) ja ne ovat hieman väärin kohdistetut ja suunnatut, koska tavanomainen elektronikka saattaa olla lineaarinen vain suhteessa $1:10^4$ ja voidaan sovittaa samanlaisella tarkkuudella. Esimerkiksi magnetometrien vain 0,1 asteen suuruinen väärä suuntaus johtaa 10 $1,5 \times 10^{-6}$ suuruiseen virheeseen. Luokkaa 100 fTm^{-1} olevien magneettikenttien mit-15 taamiseksi maan magneettikentän taustassa ($\sim 70 \mu\text{T}$), vaaditaan luokkaa $1:10^{10}$ oleva tarkkuus, ja tämä on selvästikin vaikea saavuttaa tällaisilla väärän suuntauksien vaikutuksilla.

Sen sijaan, että yrittäisi vähentää anturien ulostulot, kuten tunnetussa tekniikassa, esillä oleva järjestelmä käyttää energian minimointialgoritmia, joka on sopivan ra-15 joitukseen alainen, minkä tarkoituksesta on ottaa talteen gradientti-informaatio. Ener- gian minimointialgoritmia voidaan käyttää myös kokonaiskentän mittausarvon saa- miseksi kolmesta ortogonaalista magnetometristä samalla tavalla.

Tämä menetelmä gradientti-informaation saamiseksi on adaptiivinen siinä mielessä, että se yrittää jatkuvasti parantaa balanssia anturien ulostulojen historian perusteella 20 valitulla aika-asteikolla. Tämän energian minimointialgoritmin käyttäminen sallii yleistäkaisinkytkenän (yhteismuodon) käytön monien ongelmien voittamiseksi ole- massa olevissa järjestelmissä, kuten esimerkiksi stabiilius- ja takaisinkytkenän yhtenäisysongelmat ja tarve kalibroida ja määräätä balanssi.

Adaptiivista signaalinkäsittelyalgoritmia (ASPA, adaptive signal processing algorithm) käytetään magneettikentän gradientin mittausarvon saamiseksi magnetometrien ulostuloista ja on keksinnön olennainen näkökohta vaadittavan suuren balansitason saavuttamiseksi. Lisäksi ASPA on edullinen sikäli, että se tarjoaa balansointitekniikan, joka voidaan suorittaa jatkuvasti tosiajassa. ASPAn periaate perustuu tunnettuun matemaattiseen tekniikkaan, jota käytetään laajalti toisentyyppisissä jär-30 jestelmissä, esimerkiksi vaiheistetuissa ryhmäantenneissa adaptiivisessa keilanmuo- dostuksessa. Tämän tekniikan lähemmät yksityiskohdat löytyvät julkaisusta *Radar Array Processing*, tekijät S. Haykin, J. Litva ja T.J. Shepherd (julk. Springer-Verlag (1993)).

Gradientin mittauksen tapauksessa ASPA toimii muodostamalla (esimerkiksi) kah-35 den z -suunnassa kohdistetun ja erotetun magnetometrin ulostulot, B_{Z1} ja B_{Z2} , linea-

riseksi yhdistelmäksi $\omega_1 B_{Z1} + \omega_2 B_{Z2}$. Tämän yhdistelmän energia, määritellyn ikkunan yli, minimoidaan asettamalla kertoimet ω_1 ja ω_2 yhden tai useamman rajoituksen alaisena. Rajoituksen tarkoitus on välttää triviaaliratkaisu $\omega_1 = \omega_2 = 0$ ja tuottaa haluttu gradientti-informaatio. Tätä proseduuria kutsutaan gradiometrijärjestelmän 5 adaptiiviseksi balansoinniksi.

Rajoituksen muoto on $S^T \omega = \mu$, jossa S ja μ valitaan rajoitusmatriiseiksi (T = transpositio). Esimerkiksi jos kaksi magnetometriä 25a, 25b olisivat täydellisesti sovitetut ja kohdistetut, niin sovelletaan seuraavaa rajoitusta:

10

$$(1 \ 0) \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = 1$$

15 (jossa $S^T = (1 \ 0)$ ja $\mu = 1$) ts. $\omega_1 = 1$, algoritmi laskisi $\omega_2 = -1$. Ulostulo, joka on lineaarinen yhdistelmä $\omega_1 B_{Z1} + \omega_2 B_{Z2}$, olisi silloin $B_{Z1} - B_{Z2}$, ts. vaadittu gradientti. Jos ilmaisimet olisivat epäsovitetut, niin ω_2 olisi automaattisesti -1:stä eriävä tämän epäsovituksen vuoksi korjaten sen siten ilman kalibroinnin tarvetta.

20 Kuviossa 4 esitetään vuokaavio ASPA:n toiminnan kuvaamiseksi. Ajanhetkellä t ulostulon, $y(t)$, antaa yhtälö

$$y(t) = \underline{x}^T(t) \underline{\omega}$$

25 jossa $\underline{x}(t)$ on syötetty datajoukko ajanhetkellä t (ts. magnetometrien ulostulot) ja $\underline{\omega}$ saadaan yhtälöstä $M(t)^{-1} S (S^T M(t)^{-1} S)^{-1} \mu$. $M(t)$ on kovarianssimatriisi ajanhetkellä t ja sen antaa yhtälö

$$M(t) = \beta^2 M(t-1) + (1-\beta^2) \underline{x}(t)^2$$

30 Kullakin uudella syötetyllä datajoukolla, $\underline{x}(t)$, algoritmi laskee kovarianssimatriisiin, $M(t)$, joka riippuu edeltävästä kovarianssimatriisista, $M(t-1)$, ajanhetkellä $t-1$.

Kuviossa 5 esitetty järjestelmä sisältää kaksi magneettikentän ilmaisevaa magnetometriä 25a, 25b ja kuvaaa yleistakaisinkytkeyn gradiometrijärjestelmän toimintaperiaatetta, jota voidaan käyttää informaation antamiseksi sekä kentägradientista yhdes-

sä suunnassa että kokonaismagneettikentästä, esim. B_x ja dB_x/dx . Jos nämä kaksi magnetometriä 25a, 25b ovat täydellisesti kohdistetut, niin kaksi magnetometriä ovat riittävät antamaan kentägradientin tarkan mittausarvon. Jos magnetometrien kohdistus kuitenkin on vähänkin väärä (mitä vältämättä tapahtuu), niin magnetometrit 25a, 25b voivat olla herkkiä magneettikentille myös ortogonaalisissa y - ja z -suunnissa.

Käytännössä hyödyllisempi järjestelmä sisältää siksi magnetometrit niiden kahden suunnan tarkkailemiseksi, jotka ovat ortogonaaliset gradientin ilmaiseviin magnetometreihin 25a, 25b nähden. Nämä magneettikentät selvitetään ASPAssa magneettikentän gradientin dB_x/dx tarkemman mittauarvon tuottamiseksi. (Lisäksi B_y :n ja B_z :n mittauksia voidaan käyttää yhdessä B_x :n mittauksen kanssa kokonaiskentän saamiseksi erillistä ASPAta käyttäen.)

Tämä on esitetty kuviossa 6, joka esittää magneettikentän komponentteja B_{z1} , B_{z2} , B_{x1} , B_{y1} , jotka mitataan neljällä ilmaisimella (ei esitetty kaaviossa). Nämä neljä mitattua komponenttia, B_{z1} , B_{z2} , B_{x1} , B_{y1} , syötetään ASPAlle 34 (analogi-digitaali-muuntimen (ADC, Analogue to Digital Converter) 35 kautta). ASPAn 34 sisäänmenoille sijoitetaan vastaavasti painot ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 . Eräs rajoitus voisi olla

$$20 \quad (1 \ 0 \ 0 \ 0) \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = 1$$

25 joka määräää kertoimen ω_1 1:ksi ja sallii muiden tulla energian minimoinnin vapaasti aseteltaviksi. Tuloksena olisi, että ω_2 asettuisi lähes -1:ksi, kuten edellä selitettiin, ja ω_3 ja ω_4 tulisivat vaadittaviksi pieniksi luvuiksi, jotka korjaavat väärän kohdistukseen. ASPAn 34 ulostulo on silloin

$$30 \quad 35 \quad (B_{z1} \ B_{z2} \ B_{x1} \ B_{y1}) \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

ts. tarvittava gradientti.

Vaihtoehtoinen menetelmä, joka voi olla edullinen, olisi suorittaa B_{Z1} :n ja B_{Z2} :n vähennyslasku ja käyttää tätä yhtensä sisäänmenona ASPAlle 34. Syötettävä matriisi olisi silloin (B_{Z1} - B_{Z2} , B_{X1} , B_{Y1} , B_{Z1}) ja käytettäisiin samaa rajoitusta.

Energian minimointi tapahtuu ohjelmistossa määritetyn aikakehyksen yli, joka on mitattavaan signaaliin verrattuna pitkä. Järjestelmästä tulee siksi itsebalansoiva, se säätää itsensä tämän aikavälin yli. Balanssin muutokset, jotka ovat verrattavissa tähän ajanjaksoon tai ovat tätä hitaampia, sovitetaan pois helpottaen siksi stabiiliusrajoituksia, jotka soveltuват yksinkertaisiin vähennysmenetelmiin. Magneettikentän gradientit, jotka muuttuvat nopeammin kuin adaptointiaika, olevat ilmeisiä mitattavina gradientisignaaleina. Algoritmissa on tehokas päivitysproseduuri siten, että kukaan uusi pistejoukko sallii ikkunan liukumisen aikasarjoja pitkin.

Kuviossa 6 esitetty järjestelmä vaatii neljä magnetometriä yhden gradientin mittaumiseksi tarkasti, vaikka kutakin lisägradienttimittausta varten tarvitaan vain yksi magnetometri lisää. Esimerkiksi vielä yhden magnetometrin lisääminen sallii mittauksen dB_y/dy , ja tämän gradientin epäideaalisuudet korjataan B_x :n ja B_z :n mittauksilla.

Järjestelmän potentiaalisesti hyödyllisin konfiguraatio on 5-akselinen gradienttigradiometrijärjestelmä. Tätä järjestelmää voidaan käyttää mittamaan se minimimäärä gradientteja, joka tarvitaan dipolaarisesta lähteestä johtuvan magneettikentän kaikien itsenäisten gradienttien mallintamiseksi. Minimivaatimuksena 5-akselinen radiometrijärjestelmä gradienttien dB_x/dx , dB_y/dy , dB_z/dy , dB_x/dz ja dB_y/dz mittauksaksi käsittää kaikkiaan kahdeksan magnetometriä. Käytännössä voi kuitenkin olla edullista sallia jonkin verran redundanssia ja konfiguroida 5-akselinen gradienttijärjestelmä, jossa on useampia kuin vähintään vaaditut kahdeksan magnetometriä.

Moniakselinen gradiometrijärjestelmä toimii samalla periaatteella kuin edellä kuvattu yksiakselinen gradiometri. Tyypillisesti yleistakaisinkytentää voidaan käyttää sellaisen kelaryhmän avulla, joka käsittää päätakaisinkytentäkelat, kuten esimerkiksi Helmholtzin kelat tai korkeampaa kertalukua olevat, yhden kutakin suuntaa x, y, z kohti. Kelaryhmä voi käsittää myös lisättyt pienemmät virityskelat sovitukseen parrantamiseksi magneettisilla ilmaisimilla ja mahdollisen epäyhtenäisyyden voittamiseksi yleiskeloissa. Kelojen ulostuloja voidaan käyttää ortogonaalina kenttäestimaattoreina ASPAn suorittamassa kokonaiskentän evaluoinnissa. Samanlaista proseduuria käytetään magneettikentän gradientin mittausarvojen määrittämiseksi. Eriilinen mutta samanaikainen energian minimointi suoritetaan kullekin gradienttikomponentille. Syöttötiedot ovat joko kustakin magnetometristä tulevia aikasarjoja tai

magnetometrien ulostulojen lineaarisia yhdistelmiä. Rajoitukset valitaan gradiometrin eri komponenttien valinnan pakottamiseksi.

5 Kuvio 7 esittää kuviossa 6 kaaviollisesti kuvatun toiminnallisen järjestelmän tapauksessa saatuja tuloksia, joka järjestelmä käsittää kaksi SQUIDia Z-suunnassa (Z_1 ja Z_2 vastaavasti) ja yhden kummassakin ortogonaalisessa suunnassa (X ja Y). Neljä ylintä piirtoa esittävät ulostuloja B_{Z1} , B_{Z2} , B_{x1} , B_{y1} (kuten kuviossa 6) ja alin piirto esittää gradienttimittausta $B_{Z1}-B_{Z2}$. Ulostulot kehittää pienen magneettisen dipolin liike. Z_1 - ja Z_2 -signaalien vastakkainen luonne on osoitus siitä, että yleistakaisinkytkenämenetelmä toimii oikein, ts. magneettikenttä puolitiessä Z_1 :n ja Z_2 :n välillä 10 nollautuu.

15 Kuvio 8 esittää piirikaaviota sen kuvaamiseksi, miten gradiometrijärjestelmä voidaan konfiguroida saamaan aikaan kokonaiskenttäulostulon mittausarvo, B_T , ja viisi gradienttiulostuloa, G_{zz} (dB_z/dz), G_{xx} (dB_x/dx), G_{xz} (dB_x/dz), G_{yx} (dB_y/dx) ja G_{yz} (dB_y/dz). Tässä esimerkissä gradiometri käsittää yhdeksän magnetometriä (selvyyden vuoksi ei esitetty), joista saatavat ulostulot saavat aikaan magneettikentän komponenttien mittaukset, B_{x1} , B_{x2} , B_{x3} , B_{y1} , B_{y2} , B_{y3} , B_{z1} , B_{z2} , B_{z3} (magneettikentän komponenttien suunnat on esitetty kuviossa). Magneettikentän mittausarvot kussakin suunnassa, x, y ja z, lasketaan yhteen elektronisesti ja siirretään liittyvään integrointipiiriin 36a, 36b, 36c, josta saatavat ulostulot siirtyvät transduktanssivahvistimien 20 37a, 37b, 37c kautta ja saavat aikaan virran vastaavasti kolmeen yleistakaisinkytken-täkelaan 30a, 30b ja 30c.

25 Magneettikentän summat kussakin suunnassa x, y, z (ts. ulostulot integraattoreista 36a, 36b, 36c) antavat kokonaismagneettikentän mittausarvon x-, y- ja z-suunnissa, B_x , B_y ja B_z vastaavasti. Yleistakaisinkytkenäkelat 30a, 30b, 30c on orientoitu olen-naisesti ortogonaaliin x-, y- ja z-suuntiin ja, kuten edellä yksiakselisen gradiometri-järjestelmän tapauksessa selitettiin, niillä on se vaikutus, että ne kumoavat ympäris-tön magneettikentän.

30 Viiden gradienttimittauksen, G_{zz} , G_{xx} , G_{xz} , G_{yx} ja G_{yz} , johtamiseksi magneettikentän gradienttimittaukset, $B_{z1}-B_{z2}$, $B_{x2}-B_{x3}$, $B_{x1}-B_{x2}$, $B_{y2}-B_{y3}$ ja $B_{y2}-B_{y1}$ johdetaan elektroni- seksi (ei esitetty kuviossa) magnetometrien ulostuloista, ja nämä gradienttien esti-maattorit siirretään ADChen 21. Vastaavat digitaaliset ulostulot 42, 43, 44, 45, 46 ADCstä 35 siirretään tietokoneeseen ladatulle ASPAlle 34b yhdessä digitaalisten ulostulojen 39, 40, 41 kanssa adaptiivista signaalinkäsittelyä varten magneettikentän tarkan gradientti-informaation kehittämiseksi.

Kokonaismagneettikentän mittausarvon, B_T , saamiseksi integroidut ulostulot B_x , B_y ja B_z siirretään ADChen 35, joista saatavat vastaavat digitaaliset ulostulot 39, 40, 41 siirretään adaptiiviselle signaalinkäsittelyalgoritmile (ASPA) 34a.

Selvyyden vuoksi kuviossa 8 on esitetty kaksi adaptiivista signaalinkäsittelyalgoritmia 34a, 34b. Käytännössä kutakin itsenäistä gradientmittausta kohti tarvitaan kuitenkin erillinen energian minimointialgoritmi (ASPA). Esimerkiksi G_{xx} :n määrittämiseksi magneettikentän komponenttien summia kussakin suunnassa x , y ja z (digitaalisaaleja 39, 40, 41) ja erosignaalia B_{z1} - B_{z2} (digitaalisaalia 42) käytetään energian minimoimiseksi. Erillinen energian minimointirutiini tarvitaan myös koko-10 naiskentän mittausta varten. Käytännössä on kuitenkin kätevää ladata kaikki tarvitavat algoritmit yhteen tietokoneeseen.

Kuviossa 8 esitetty esimerkki edustaa vain yhtä tapaa yhdistää ulostulot yhdeksästä magnetometristä magneettikentän viiden gradientin mittausarvon saamiseksi. Magnetometrien ulostulojen muita lineaarisia yhdistelmiä voidaan myös käyttää sisään-15 menoina adaptiiviselle signaalinkäsittelyalgoritmile tällaisen informaation saamiseksi.

Täydelliselle rakenteelle asetetut jäykkyysvaatimukset merkitsevät sitä, että sen tulisi mieluummin olla mahdollisimman kevyt ja jäykki. Eräs sopiva rakenne voi olla ohutseinäisistä hiilikuituputkista tehty tetraedri, jossa magnetometrien ryhmät on 20 asetettu kuhunkin kärkipisteesseen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ristin muotoista rakennetta.

Gradiometrijärjestelmässä, joka on suunniteltu olemaan liikuteltava, esim. liikkuval-25 la alustalla, perusviiva voi tyypillisesti olla 40 mm ja 100 mm välillä, koska pienemät rakenteet antavat paremman jäykkyden kuin suuremmat. Jos gradiometri tulee kuitenkin pysymään paikallaan, voidaan käyttää pitempää perusviivaa paremman herkyyden antamiseksi vähemmän jäykälle gradiometrille. Sama herkkyys voidaan toteuttaa käyttäen herkempia magnetometriä lyhyemmällä perusviivalla 30 jäykkyden suurentamiseksi, esimerkiksi SQUID-magnetometrejä, jotka on valmistettu 25 mm sirulle 40 mm välein, pikemminkin kuin 10 mm sirulle 100 mm perusviivalla.

Yleistakaisinskytkentäkelojen täytyy mieluummin olla riittävän suuret olennaisesti tasaisen magneettikentän kehittämiseksi magnetometrien kohdalle, ja yleistakaisinskytkentäkelojen koon määrä jossakin määrin se nimenomaisen sovellus johon järjestelmää käytetään. Esimerkiksi jos suuri tila on käytettävissä, ehkä staattiselle ra-

kenteelle, jossa perusviiva on pitempi, yleistakaisinkytkentäkelat voivat olla suuria, halkaisijaltaan tyypillisesti 1 m, mikä synnyttää tasaisen magneettikentän kaikkien magnetometrien kohdalle. Kääntäen jos perusviiva on lyhyt ja käytettävissä oleva tiila rajoitettu, yleistakaisinkytkentäkelat voivat olla paljon pienemmät, esimerkiksi 5 10-20 cm. Erityisesti pienemmän halkaisijan omaavien yleiskelojen tapauksessa voidaan käyttää pienempää virityskeloja kenttäsovituksen parantamiseksi magnometreissä ja mahdollisen epäyhtenäisyyden voittamiseksi yleiskeloiissa.

Yleistakaisinkytkennän käyttämisen tärkeys järjestelmässä riippuu nimenomaisten järjestelmään kuuluvien magnetometrien herkkyydestä. Mitä herkempi magneettinen ilmaisin, sitä tärkeämpää on käyttää yleistakaisinkytkentää suuren dynaamisen alueen aikaansaamiseksi. Kuviossa 4 esitetyn järjestelmän tapauksessa, joka käsittää suuren herkkyyden omaavat SQUID-magnetometrit, on edullista sisällyttää järjestelmään kokonaistakaisinkytkentä. Järjestelmään voi kuitenkin kuulua muita magneettisia ilmaisia, esimerkiksi fluxgate-laitteita, Hall-antureita tai magnetoresistivisiä laitteita, jotka ovat tyypillisesti vähemmän herkkiä kuin SQUID-magnetometrit mutta voivat olla riittävän herkkiä tiettyihin sovelluksiin. 10 15

Jos järjestelmään sisältyy vähemmän herkkiä magnetometrejä ja jos tarvitaan pienempää dynaamista aluetta, niin järjestelmää voidaan käyttää ilman yleistakaisinkytkentää. Tässä tapauksessa magnetometrien ulostulot syötetään ASPAlle adaptiivista signaalin balansointia varten, kuten edellä selitettiin, mistä tarvittava magneettikentän gradientti tai kokonaiskenttäinformaatio voidaan tulostaa. 20

Jos järjestelmään sisältyy SQUID-magnetometrejä, niitä täytyy käyttää kryogeenissä ympäristössä (esim. kryostaatissa, joka sisältää nestetyppeä tai -heliumia) SQUIDien pitämiseksi sopivan matalassa lämpötilassa. Paikalliset takaisinkytkentäkelat voidaan yhdistää SQUID-magnetometrien siruille, joiden mitta tyypillisesti on 10 mm ja 50 mm välillä. Paikalliset takaisinkytkentäkelat järjestävät vuolukituksen SQUIDille. Sisäkkäisten takaisinkytkentäsilmukoiden kahden ryhmän käyttäminen toteuttaa pienen kohinan ja tarkan erotuskyvyn vaatimuksen kenttägradientin mittaustarkoituksissa samalla kun saadaan aikaan riittävä dynaaminen alue ulommassa 25 30 yleistakaisinkytkentäsilmukassa maan magneettikentän käsittelyiseksi.

Vaihtoehtoisessa suoritusmuodossa järjestelmää voidaan käyttää mittaamaan magneettikentän toisen tai korkeamman kertaluvun gradienttikomponentteja (ts. d^2B_x/dx^2 , d^2B_y/dy^2 jne.). Esimerkiksi kuviossa 5 esitetty kaksi magnetometriä voidaan korvata kolmella magnetometrillä, jotka orientoidaan olennaisesti samaan suuntaan ja sijoitetaan tasavälein $B_{x1:n}$, $B_{x2:n}$ ja $B_{x3:n}$ mittaamiseksi. Kolme ulostu- 35

loa voitaisiin laskea yhteen ja integroida tarvittavan yleistakaisinkytkenän järjestämiseksi. Tarvittava lineaarinen yhdistelmä $\partial^2 B_x / \partial x^2$:n mittaamiseksi on $B_{x1} - 2B_{x2} + B_{x3}$, joka saadaan helposti valitsemalla ASPAssa sopiva rajoitus. Tämä koonpano voidaan laajentaa monen akselin järjestelmäksi. Erityisesti järjestelmä 5 magneettikentän toisen tai korkeamman asteen gradienttien mittaamiseksi voi olla hyödyllinen sellaisissa sovelluksissa, jotka vaativat poikkeuksellisen suurta ulkoisten häiriöiden vaimennusta, kuten esimerkiksi lääketieteellisissä skannaussovelluksissa.

Joissakin sovelluksissa yleistakaisinkytketäkelat voivat olla olennaisesti suurempia 10 kuin magnetometriyhämä. Tämä konfiguraatio olisi hyödyllinen, mikäli mitattavien gradienttikentien lähde on hyvin lähellä magnetometriyhämää. Esimerkki tästä on biomagneetisessa ilmaisinjärjestelmässä. Esimerkiksi kuvion 9 mukaan ihmissektaria 50 huoneessa 55 voidaan tutkia magnetismin määrittämiseksi käyttäen magnetometrien ryhmää 25, kuten esimerkiksi SQUID-magnetometrien ryhmää. Esityssä 15 sovitelmassa yleistakaisinkytketäkelat 30a, 30b, 30c ympäröivät ihmissektaria 50 ja magnetometrejä 25. Yleistakaisinkytketäkelat 30a, 30b, 30c on sovitettu kolmeen olennaisesti ortogonaaliseen tasoon ja ne saavat aikaan olennaisesti tasaisen magneettikentän magneettisten ilmaisimien 25 kohdalle. Lisäksi yleistakaisinkytketäkelaryhmät 60a, 60b, 60c voidaan konfiguroida takaisinkytkemään magneettikentän ensimmäisen kertaluvun gradientit (selvyyden vuoksi kelaryhmän 60c etumaisinta komponenttia ei ole esitetty, ja ihmissektori 50 peittää osan takimmaisesta komponentista). Toiminnan aikana ulostulot magneetistä ilmaisimista käsitellään 20 edellä selitettyä adaptiivista signaalinkäsittelytekniikkaa käytäen.

Tunnetuissa biomagneetissä järjestelmissä mittauksia on tehty kalliissa magneettiseksi suojattuissa huoneissa. Kuviossa 9 esitettävässä sovitelmassa yleistakaisinkytketäkelat 30a, 30b, 30c korvaavat tämän magneettisesti suojatun huoneen. Yleistakaisinkytketäkelat voidaan konfiguroida takaisinkytkemään tasainen magneettikentä ja myös magneettikentän ensimmäisen kertaluvun gradientit. Tämä saa aikaan ulkoisten kentälähteiden olennaisen vaimennuksen.

30 Yleisesti ottaen järjestelmää voidaan käyttää useissa sovelluksissa, joissa tarvitaan magneettikentän ilmaisia. Järjestelmä voi olla erityisen hyödyllinen käytettäväksi esimerkiksi geologisessa tutkimuksessa, ei-tuhoavassa evaluoinnissa tai lääketieteellisissä sovelluksissa, kuten esimerkiksi biomagneetisessa skannauksessa.

Patenttivaatimukset

1. Järjestelmä magneettikentän yhden tai useamman gradienttikomponentin mittaamiseksi, joka järjestelmä käsittää:
 - (i) vähintään kaksi magneettista ilmaisinta (25a, 25b), jotka ilmaisevat magneettikentän, jolloin kukaan ilmaisin kehittää ilmaisinulostulon, joilla mainituilla ilmaisinulostuloilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E, ja jolloin vähintään kaksi ilmaisimista on sovitettu ilmaisemaan magneettikenttä olennaisesti samassa suunnassa, ja
 - (ii) välineet ilmaisinulostulojen (31, 32, 30a, 30b) adaptiivisen signaalinkäsittelyn suorittamiseksi siten, että järjestelmä on adaptiivisesti balansoitu, jolloin mainitut välineet kehittävät magneettikentän yhden tai useamman gradienttikomponentin,

10 tunnennut siitä, että

 - (iii) järjestelmä käsittää yleistakaisinkytikentävälineet (30a, 30b) olennaisesti tasaisen magneettikentän aikaansaamiseksi mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla, ja
 - (iv) adaptiiviset signaalinkäsittelyvälineet käsittävät välineet (34a, 34b, 35) ilmaisinulostulojen kokonaisenergian E minimoimiseksi rajoituksen alaisena, jolloin rajoitus määrä, mikä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tuotetaan.
2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa välineet (34a, 34b, 35) ilmaisinulostulojen kokonaisenergian E minimoimiseksi voivat myös tuottaa kokonaismagneettikentän mittausarvon, jolloin rajoitus määrä, mikä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tai kokonaismagneettikentän mittausarvosta tuotetaan.
- 25 3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa adaptiiviset signaalinkäsittelyvälineet sisältävät tietokoneen (34a, 34b, 35), johon on ladattu adaptiivinen signaalinkäsittelyalgoritmi (ASPA, adaptive signal processing algorithm).
4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytikentävälineet (30a, 30b) on sovitettu aikaansaamaan olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla.
- 30 5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytikentävälineet käsittävät vähintään yhden yleistakaisinkytikentäkelaryhmän (30a, 30b).

6. Patenttivaatimuksen 5 mukainen järjestelmä, jossa kuka mainituista yhdestä tai useammasta yleistakaisinkytäkelaryhmästä käsittää kaksi tai useampia kuin kaksi Helmholtzin kelaa (30a, 30b, 30c).

7. Patenttivaatimuksen 6 mukainen järjestelmä, joka käsittää myös:

5 väliset vähintään yhden erosignaalin kehittämiseksi kahden ilmaisinulostulon välillä, jolloin mainitut ilmaisinulostulot vastaavat kuka magneettikentää olennaisesti samassa suunnassa, ja

analogi-digitaalimuunnosväliset (35) mainitun yhden tai useaman erosignaalin ja mainittujen kahden tai useaman ilmaisinulostulon muuntamiseksi vastaavaksi 10 digitaaliseksi dataksi.

8. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa vähintään yksi magneettisista ilmaisimista on mikä tahansa seuraavista: fluxgate-ilmaisin, Hall-anturi-ilmaisin tai magnetoresistiivinen ilmaisin.

9. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa vähintään yksi magneetti-

15 sisista ilmaisimista on SQUID-magnetometri.

10. Patenttivaatimuksen 9 mukainen järjestelmä, joka käsittää myös jäähdytysvälineet SQUID-magnetometrin lämpötilan alentamiseksi.

11. Patenttivaatimuksen 10 mukainen järjestelmä, jossa kussakin SQUID-magne-

20 tometrissä on siihen liittyvät paikallistakaisinkytävälineet (26a, 26b) magneetti-

vuon olennaisesti vakion tilan ylläpitämiseksi asianomaisessa SQUID-magnetometrissä.

12. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, joka käsittää:

vähintään neljä magneettista ilmaisinta magneettikentän ilmaisemiseksi, jolloin kolme ilmaisimista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän kolmessa

25 olennaisesti ortogonaalisessa suunnassa, ja jolloin vähintään kaksi mainituista ilmaisimista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän olennaisesti samassa suunnassa.

13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen järjestelmä, joka käsittää vähintään kahdeksan magneettista ilmaisinta.

14. Patenttivaatimuksen 13 mukainen järjestelmä, jossa mainitut kahdeksan tai useammat kuin kahdeksan magneettista ilmaisinta on sovitettu tetraedrirakenteen kärkipisteisiin.

15. Patenttivaatimuksen 14 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytkentäväli-
5 neet käsittävät kolme yleistakaisinkytkentäkelaryhmää (30a, 30b, 30c), jotka on orientoitu kolmeen olennaisesti ortogonaaliseen suuntaan, olennaisesti tasaisen magneettikentän kehittämiseksi kunkin kahdeksan tai useaman magneettisen il-
maisimen kohdalla.

16. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, joka käsittää vähintään kolme
10 magneettista ilmaisinta, jolloin vähintään kolme ilmaisimista on orientoitu olennai-
sesti samaan suuntaan ja jolloin välineet, jotka suorittavat adaptiivisen signaalinkä-
sittelyn, voivat kehittää magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikom-
ponentin.

17. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa mukainen järjestelmä on
15 sovitettu saamaan aikaan biomagneettinen ilmaisujärjestelmä (55).

18. Patenttivaatimuksen 17 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytkentäväli-
neet käsittävät vähintään yhden yleistakaisinkytkentäkelaryhmän (30a, 30b tai 30c),
joka on sovitettu ympäröimään mitattavan magneettikentän kehittävää subjektiä
20 (50), jolloin subjekti (50) on aivan kahden tai useaman magneettisen ilmaisimen
(25) lähellä.

19. Menetelmä magneettikentän vähintään yhden gradienttikomponentin mittaami-
seksi gradiometriä käyttäen, joka menetelmä käsittää seuraavat vaiheet:
25

- (i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kahdessa tai useammassa paikassa
kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta (25a, 25b) käyttäen, jolloin vähintään
kaksi magneettikentän komponenttia ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,
- (ii) tuotetaan kaksi tai useampia kuin kaksi lähtösignaalia, joilla on niihin liittyvä
kokonaisenergia E, joka vastaa mainittuja magneettikentän komponentteja,
- (iii) järjestetään yleistakaisinkytkentä olennaisesti tasaisen magneettikentän muo-
dossa mainittujen kahden tai useaman magneettisen ilmaisimen (25a, 25b) kohdal-
30 la,

- (iv) suoritetaan lähtösignaalien adaptiivinen signaalinkäsittely ja minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E, rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu,
- (v) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän gradienttikomponentti, ja
- (vi) tuotetaan vähintään yksi magneettikentän gradienttikomponentin mittausarvo.

20. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, joka käsittää seuraavat vaiheet:

- (i) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja

10 (ii) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan kokonaismagneettikentän mittausarvo.

21. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, jossa magneettikentän komponentit kahdessa tai useammassa paikassa ilmaistaan kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta (25a, 25b) käytäen ja joka käsittää lisäksi vaiheen, jossa järjestetään olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti mainittujen kahden tai useaman magneettisen ilmaisimen kohdalla.

15 22. Patenttivaatimuksen 21 mukainen menetelmä magneettikentän komponenttien mittamiseksi ihmissubjektissa (50) aivan mainittujen kahden tai useaman magneettisen ilmaisimen (25) lähellä.

20 23. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, joka käsittää seuraavat vaiheet:

- (i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kahdessa tai useammassa paikassa, jolloin vähintään kolme mainituista magneettikentän komponenteista ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,
- (ii) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja
- (iii) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentti.

Fig.1.
TEKNIIKAN TASO

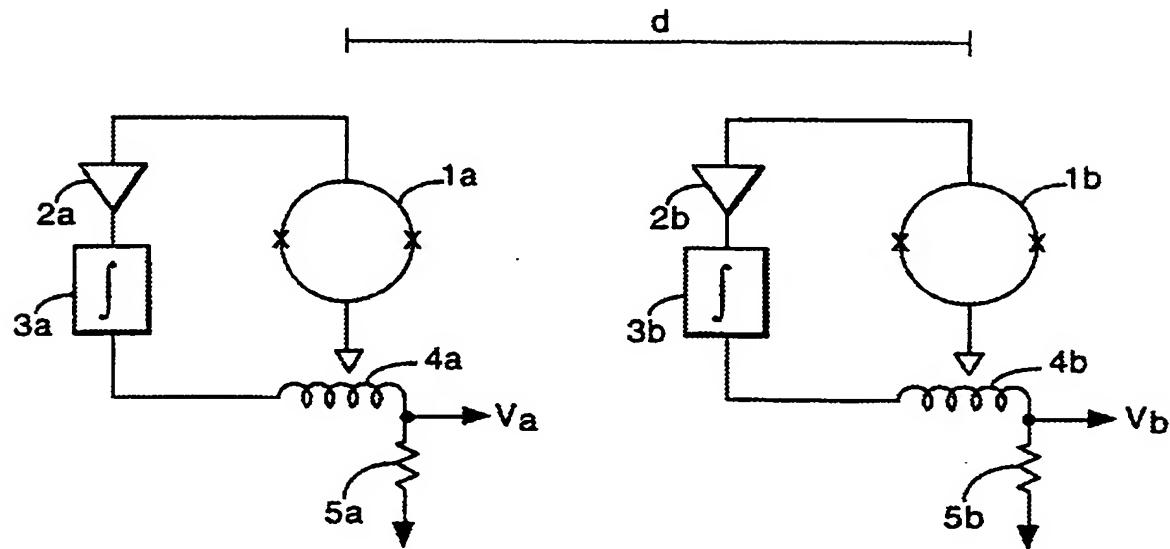
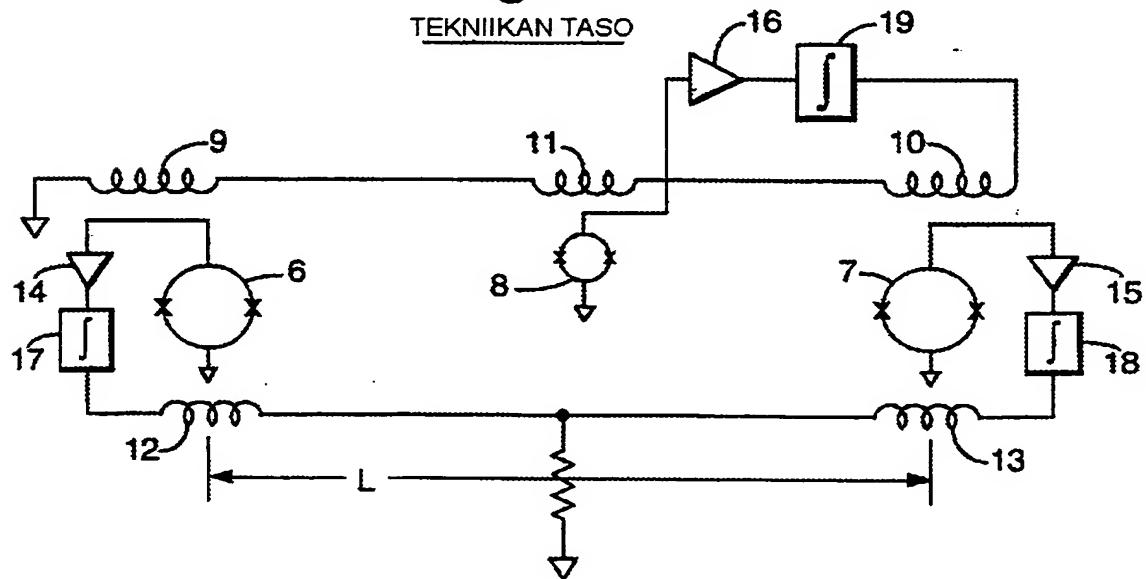


Fig.2.
TEKNIIKAN TASO



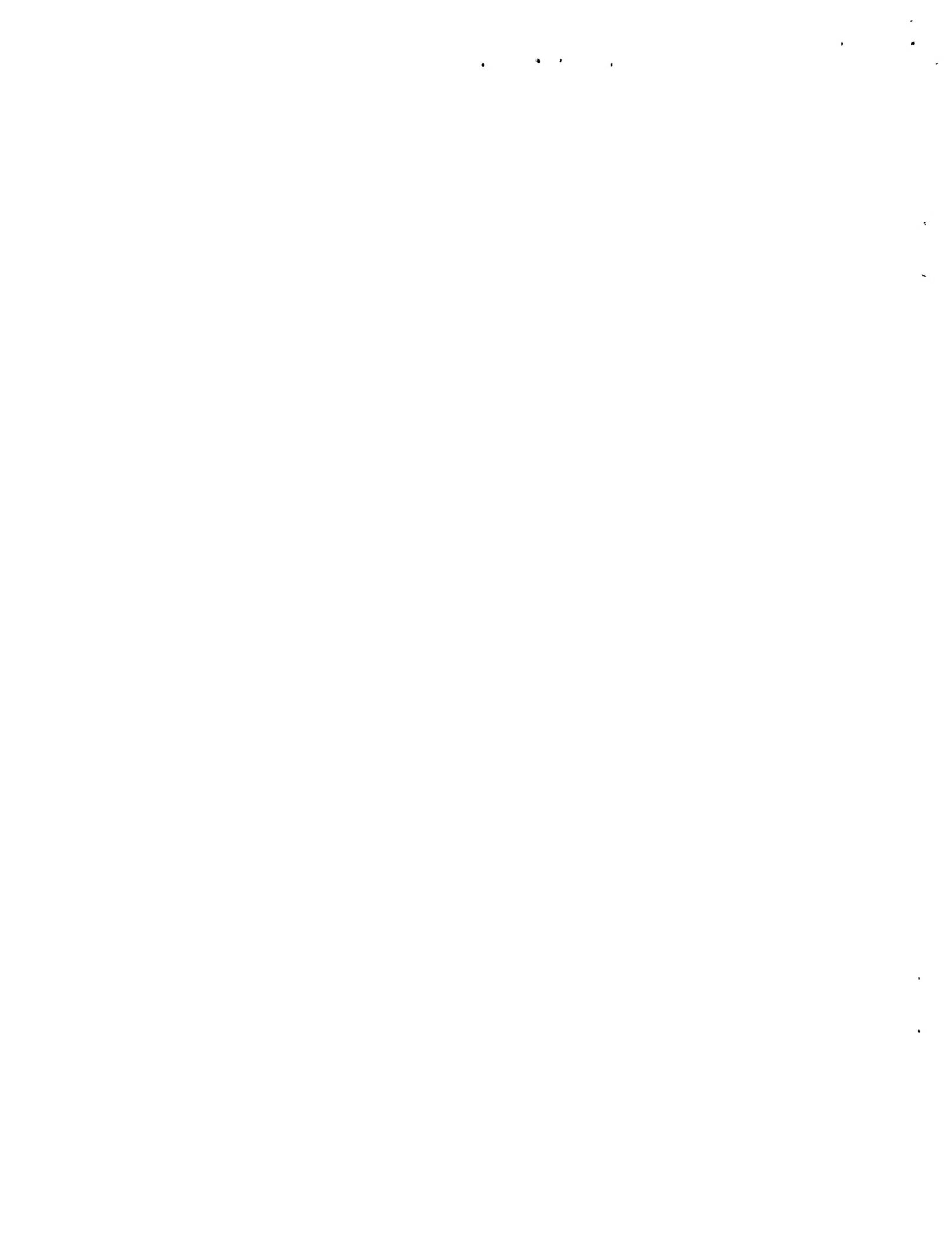


Fig.3.

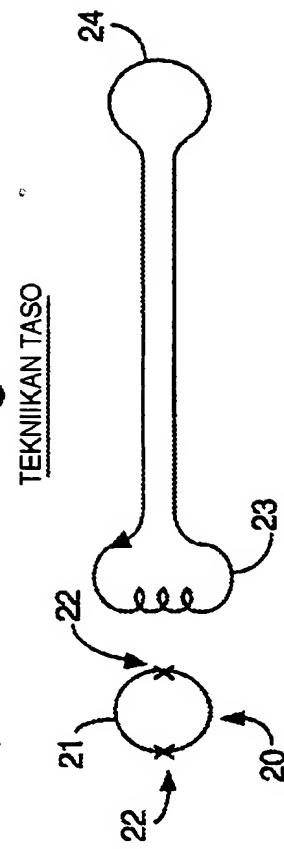


Fig.4.

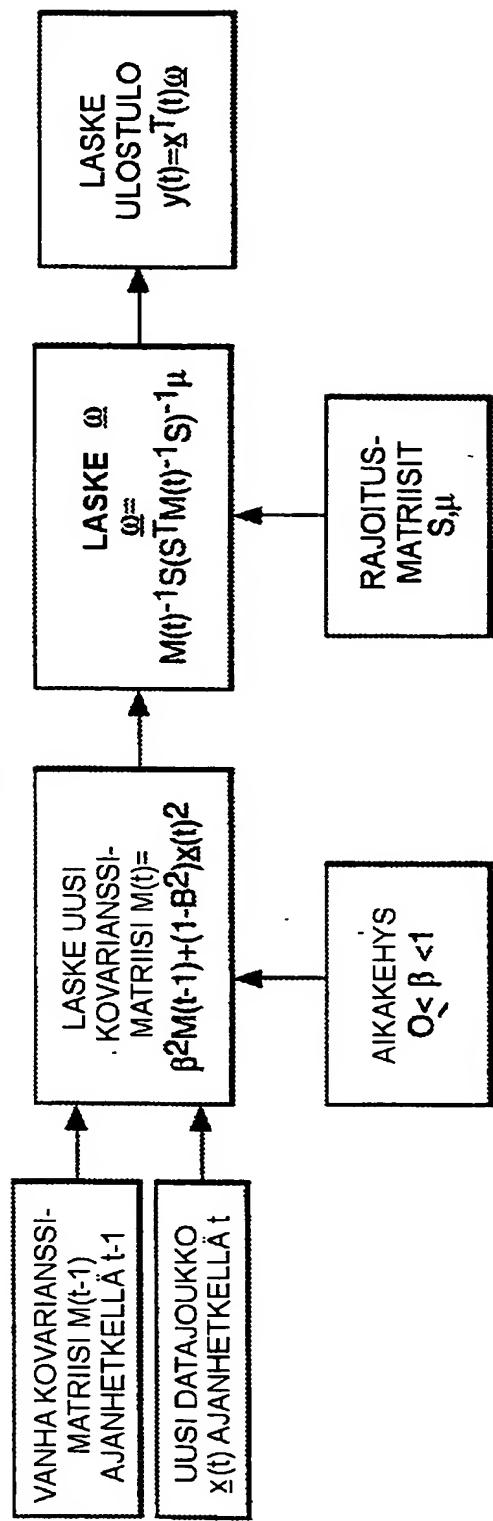
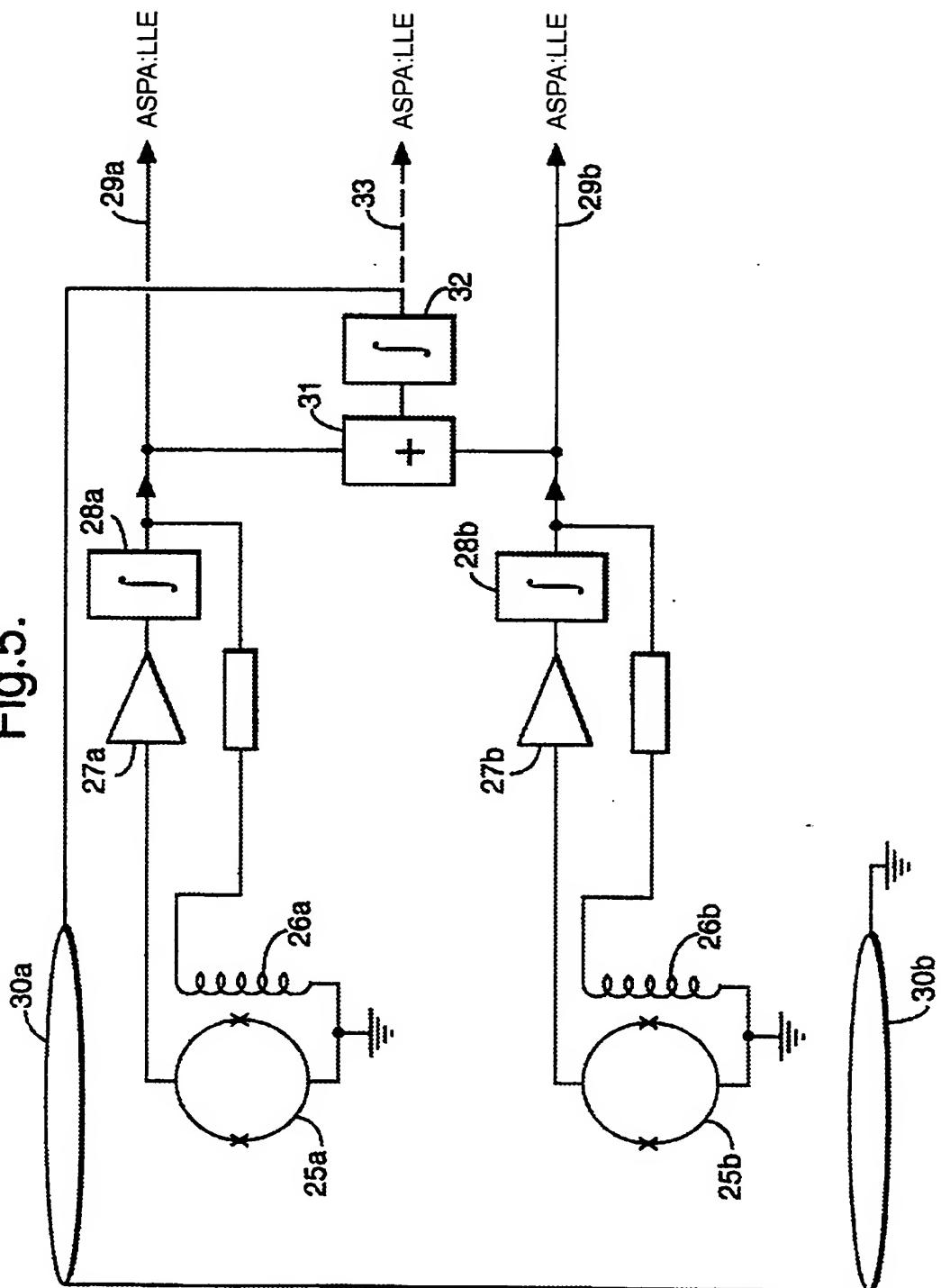




Fig.5.



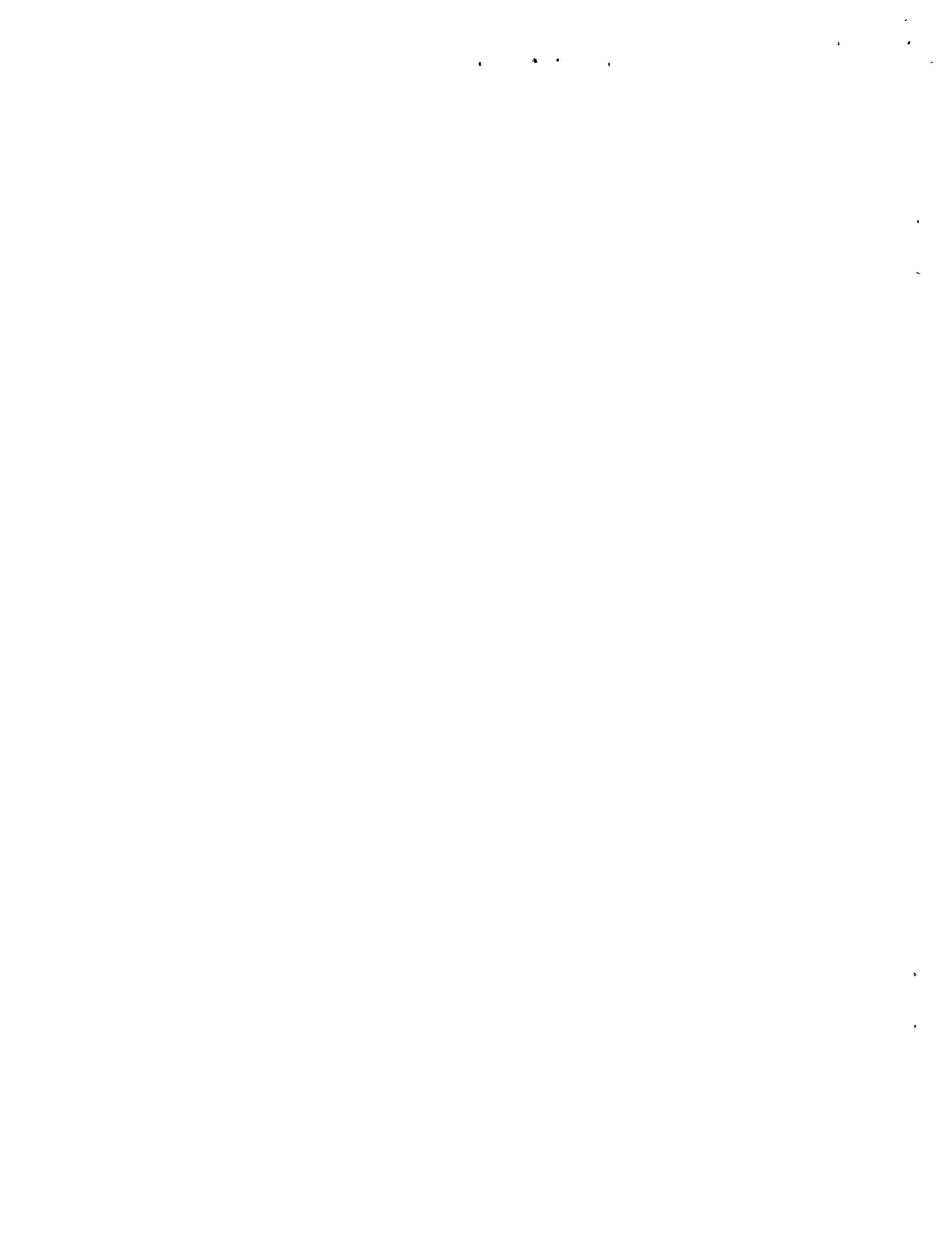


Fig.6.

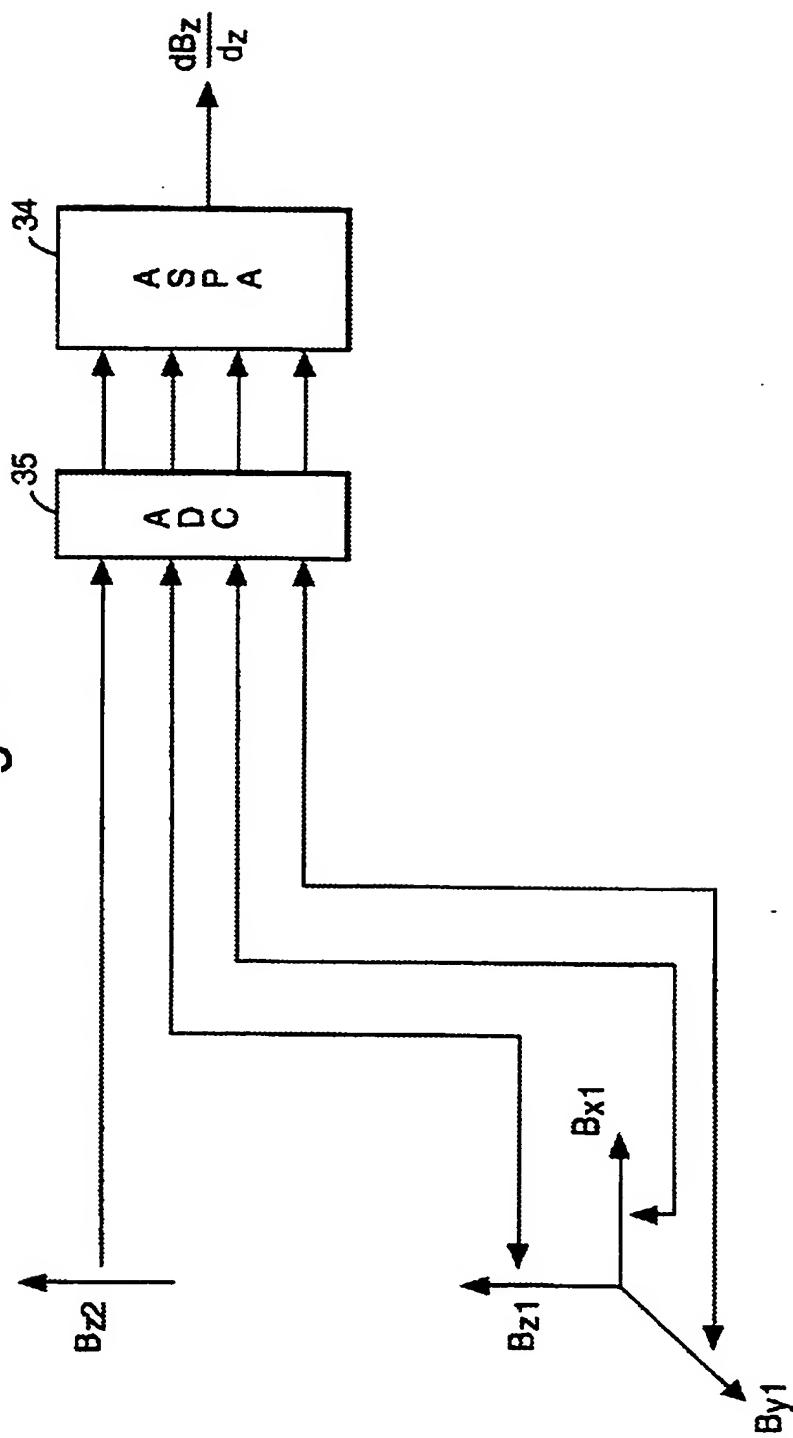
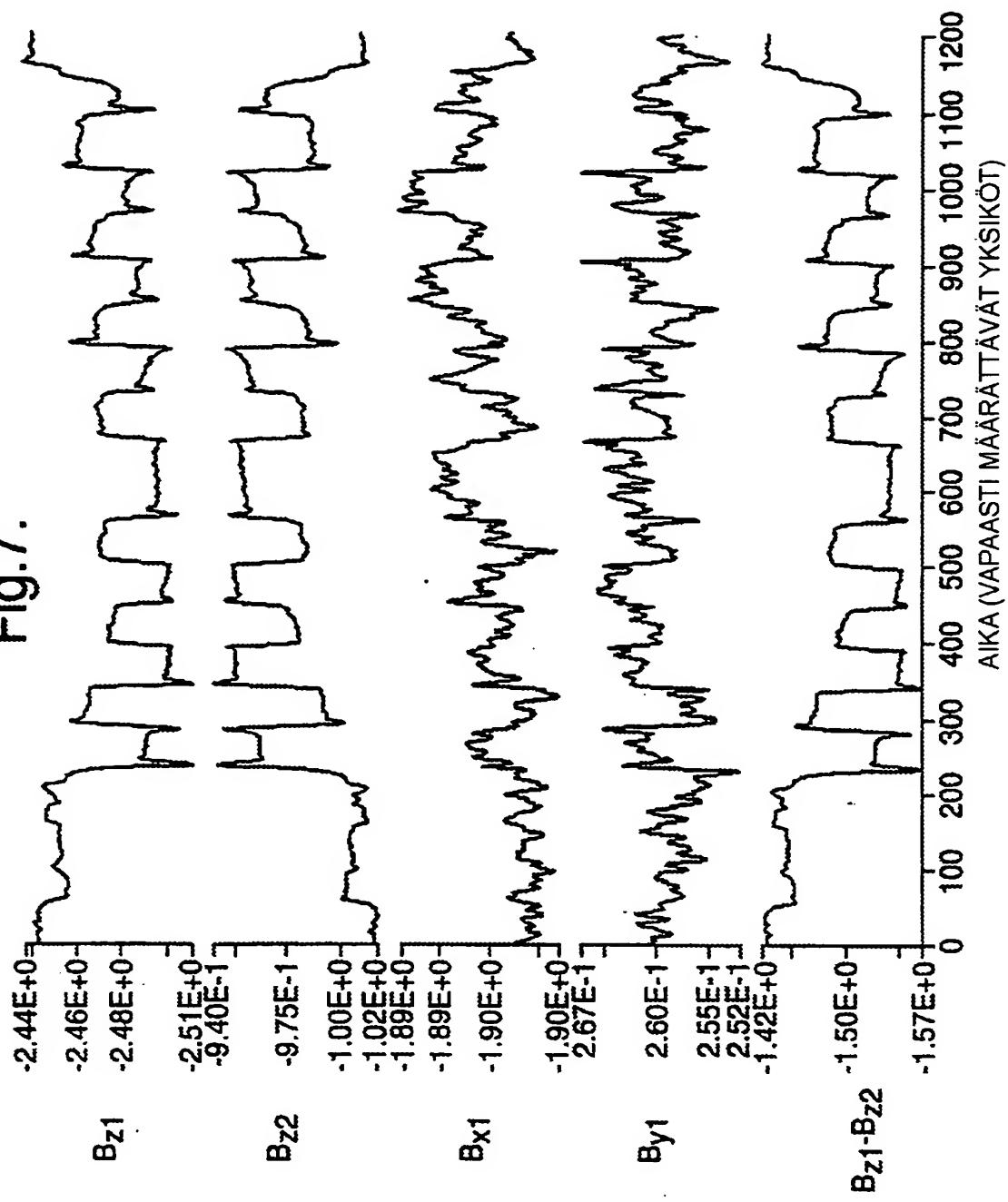
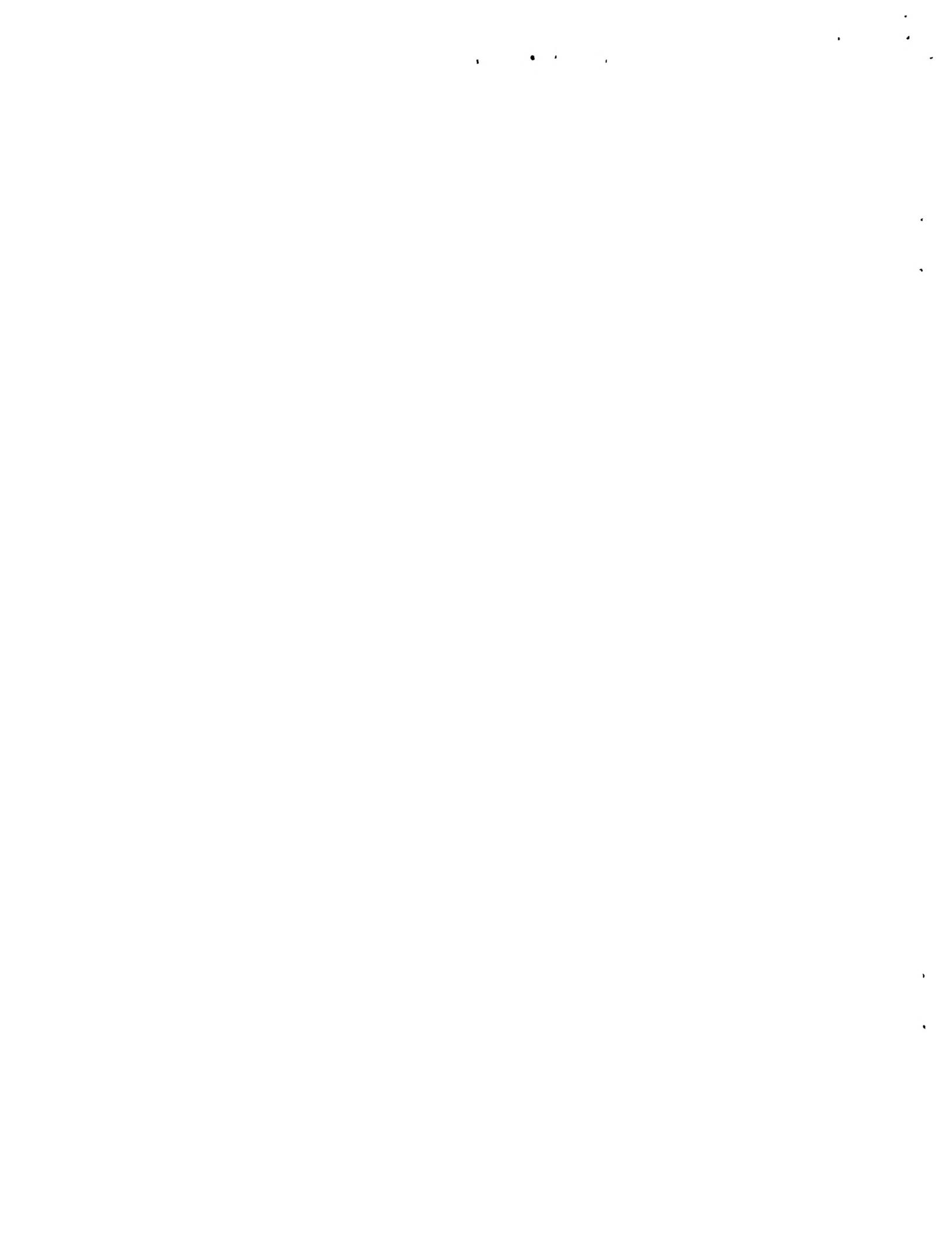




Fig. 7.





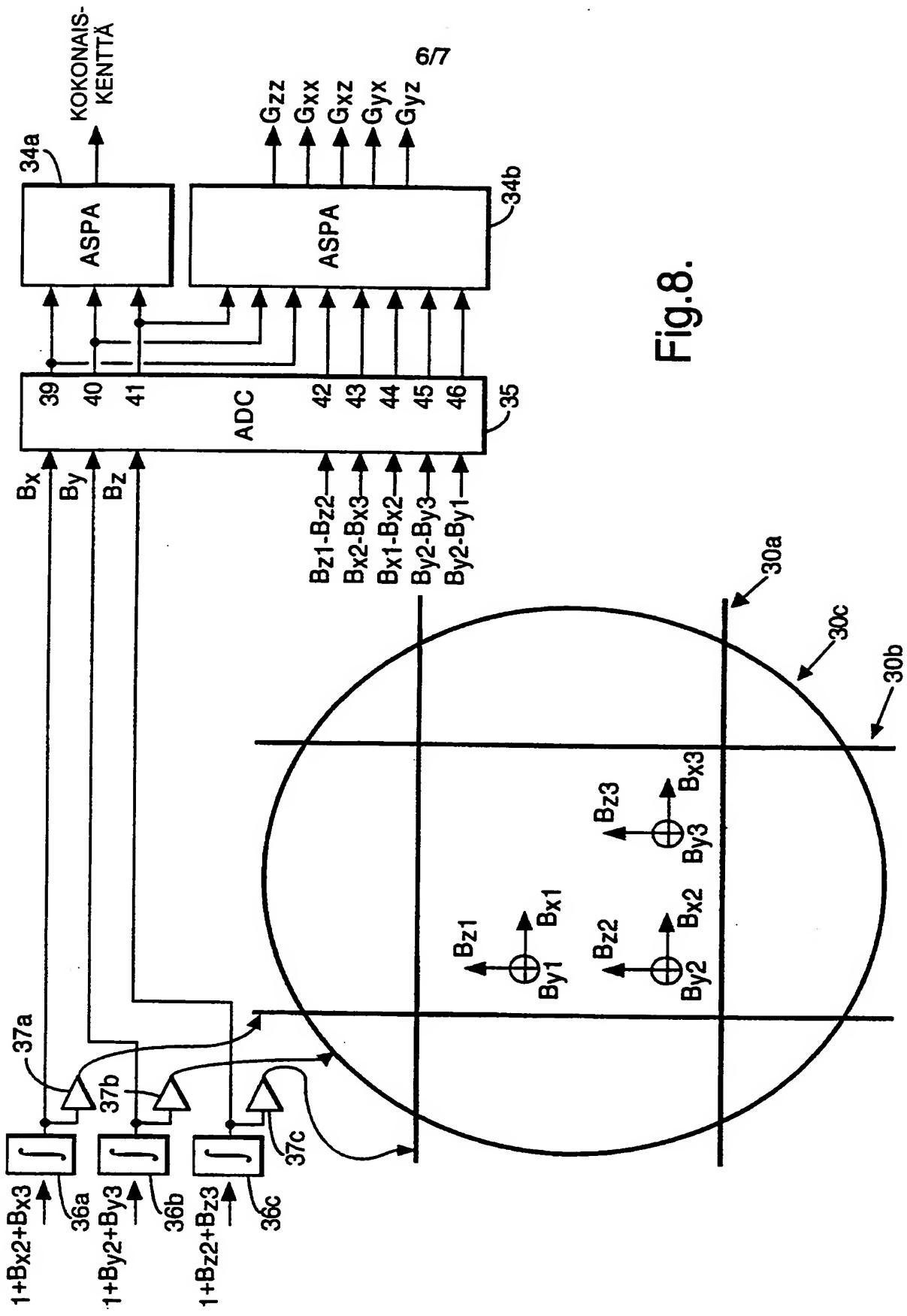


Fig.8.

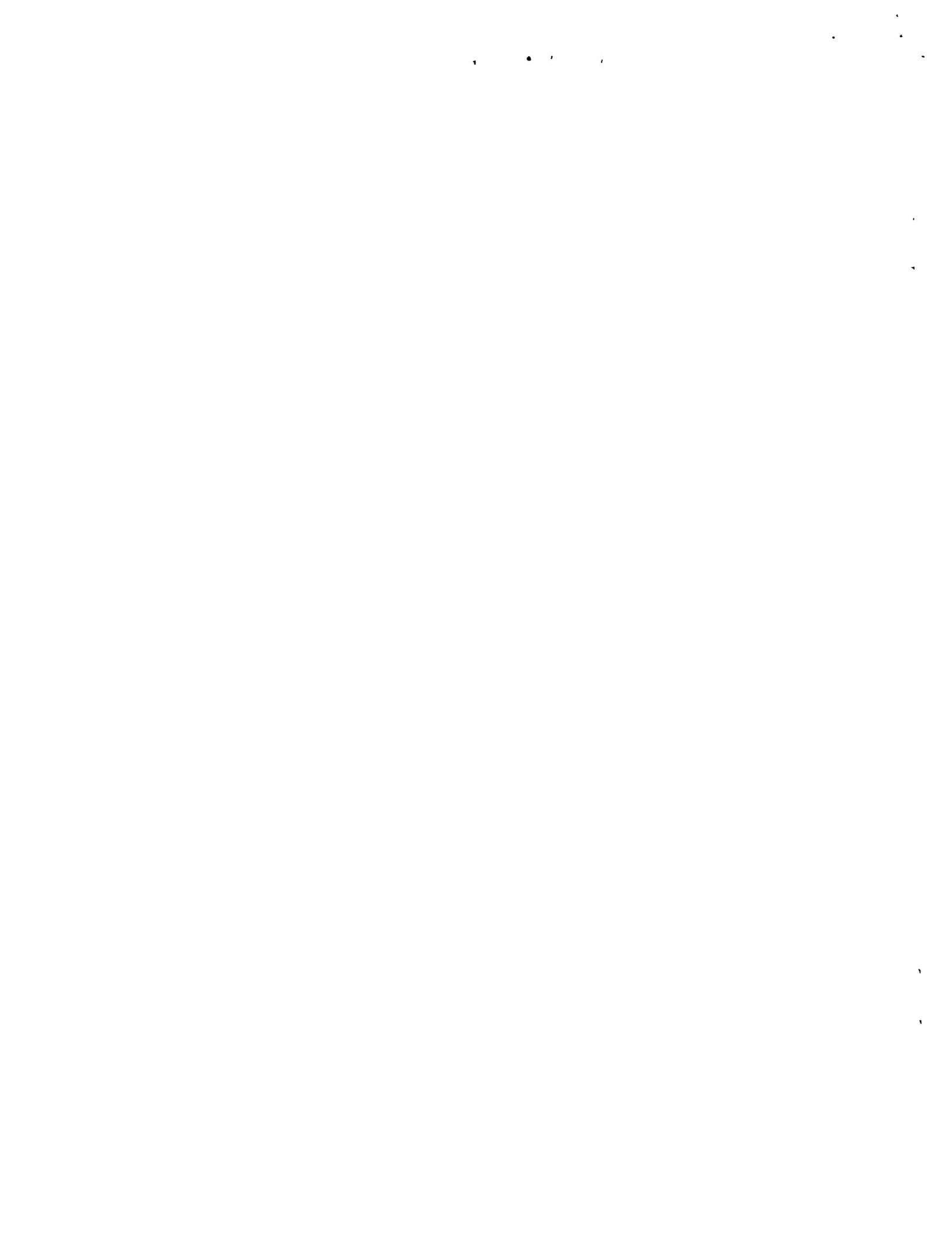
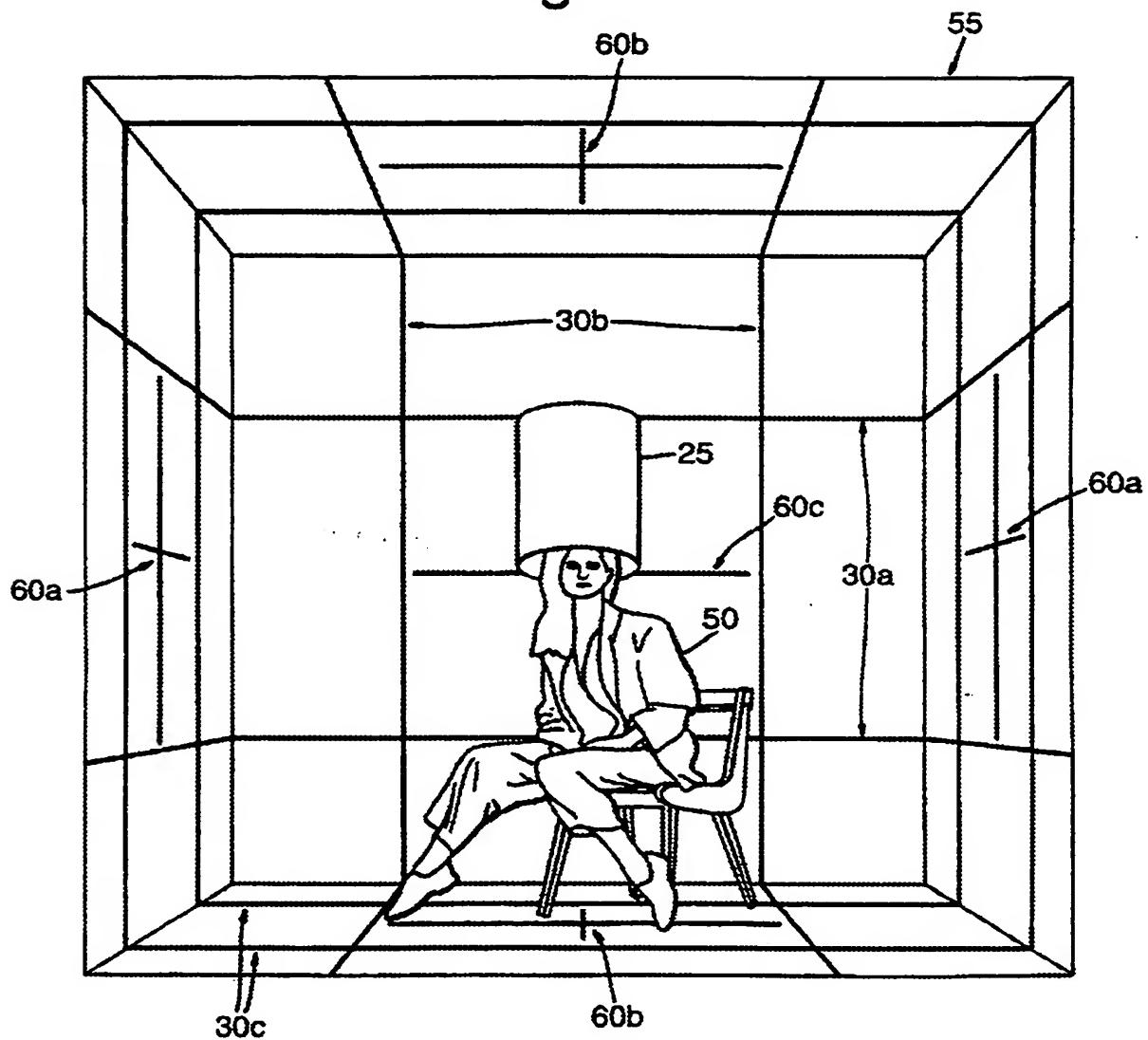


Fig.9



THIS PAGE BLANK (USPTO)